

การวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ของแบบจำลอง SWAT: กรณีศึกษาพื้นที่ตอนล่างของเขื่อนลำปาว

Sensitivity Analysis of SWAT Model Parameters: A Case Study of the Lower Areas of the Lam Pao Dam

ธีรณัย เรียงไธสง (Theeranai Reangthaisong)* ดร.วรพงษ์ โล่ห์ไพศาลกฤต (Dr.Worapong Lohpaisankrit)^{1**}

ดร.หริส ประสารฉ่ำ (Dr.Haris Prasanchum)***

(Received: July 8, 2022; Revised: August 31, 2022; Accepted: September 23, 2022)

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ของแบบจำลอง SWAT ที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำท่าในพื้นที่ตอนล่างของเขื่อนลำปาว เนื่องจากพื้นที่ศึกษาเป็นพื้นที่กลางน้ำจึงได้รับอิทธิพลจากฝนที่ตกลงบนพื้นที่เอง และยังได้อิทธิพลจากน้ำท่าด้านเหนือน้ำไหลเข้าพื้นที่ ดังนั้นการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองจึงมีความสำคัญ การวิเคราะห์ใช้โปรแกรม SWAT-CUP และผลการศึกษาพบว่า พารามิเตอร์จำนวน 5 ตัว (ALPHA_BNK CH_K2 CH_N2 ESCO และ REVAPMN) มีความอ่อนไหวต่อปริมาณน้ำท่า เนื่องจากมีค่าดัชนี p-value น้อยกว่า 0.1 และค่าสัมบูรณ์ของดัชนี t-stat มีค่ามากที่สุดเป็น 5 อันดับแรก นอกจากนี้ ผลการคำนวณปริมาณน้ำท่าด้วยแบบจำลอง SWAT อยู่ในเกณฑ์ดี เพราะค่าเฉลี่ยของ R^2 NSE และ PBIAS ช่วง ปี พ.ศ. 2551-2560 เท่ากับ 0.71 0.75 และ 3.85% ตามลำดับ การศึกษานี้แนะแนวทางในการสร้างแบบจำลองอุทกวิทยาให้เหมาะสมกับการประมาณปริมาณน้ำท่า

ABSTRACT

The purpose of this study was to analyze the sensitivity of SWAT model parameters affecting runoff for the lower areas of the Lam Pao Dam. Since the study area is a midstream catchment, its runoff is influenced by rains and also the upstream runoff. Thus, analysis of the model parameters is essential. The analysis was performed by using the SWAT-CUP program. The results showed that ALPHA_BNK, CH_K2, CH_N2, ESCO, and REVAPMN were the most sensitive to the simulated runoff outcomes because their p-values were lower than 0.1 and the absolute values of t-stat were the top five values of the analysis. Moreover, the runoff simulates of SWAT model were acceptable because the values of R^2 , NSE, and PBIAS during the year 2008-2017 were 0.71, 0.75, and 3.85%, respectively. This study provides guidelines on hydrological modeling in runoff estimation.

คำสำคัญ: แบบจำลองอุทกวิทยา การวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ น้ำท่าผิวดิน

Keywords: Hydrological model, Parameter sensitivity analysis, Surface runoff

¹Corresponding author: woralo@kku.ac.th

*นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

**ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

***ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตขอนแก่น

บทนำ

การเกิดอุทกภัยในประเทศไทยแต่ละครั้งสร้างความเสียหายต่อชีวิต ทรัพย์สิน และพื้นที่ทางเศรษฐกิจ ผลกระทบจากอุทกภัยมีความรุนแรงเนื่องจากการขยายตัวของเมืองอย่างรวดเร็ว ส่วนใหญ่สาเหตุของการเกิดน้ำท่วมมาจากฝนตกหนัก หรือฝนตกติดต่อกันเป็นเวลานาน เมื่อฝนเปลี่ยนเป็นน้ำผิวดินและมีปริมาณมากกว่าความจุของลำน้ำจะทำให้เกิดการไหลล้นตลิ่งและท่วมพื้นที่ราบข้างลำน้ำ ตัวอย่างเหตุการณ์อุทกภัยเมื่อวันที่ 9-11 สิงหาคม พ.ศ. 2560 พื้นที่ลุ่มน้ำลำปาวได้รับอิทธิพลจากพายุลาตัสและเซินกาทำให้มีฝนตกเป็นบริเวณกว้างและต่อเนื่องกันหลายวัน ส่งผลให้มีปริมาณน้ำไหลเข้าอ่างเก็บน้ำเขื่อนลำปาวเป็นจำนวนมาก อีกทั้งพายุดังกล่าวก่อให้เกิดฝนตกหนักในพื้นที่ตอนล่างของอ่างเก็บน้ำเขื่อนลำปาว ดังนั้นการบริหารจัดการน้ำท่วมในลุ่มน้ำลำปาวตอนล่างเป็นไปด้วยความยากลำบากและทำลาย เนื่องจากได้รับผลกระทบจากปริมาณน้ำที่ระบายออกจากเขื่อนลำปาวในสภาวะวิกฤตน้ำท่วมเพื่อรักษาความปลอดภัยของเขื่อนตามหลักวิศวกรรมและปริมาณฝนตกบนพื้นที่ลุ่มน้ำลำปาวตอนล่างเอง [1] ส่วนใหญ่ การศึกษาและวิเคราะห์คุณลักษณะทางอุทกวิทยาของพื้นที่นิยมใช้แบบจำลองอุทกวิทยา โดยการศึกษาได้ใช้แบบจำลอง Soil and water assessment tool (SWAT) ซึ่งเป็นแบบจำลองประเภทการกระจายค่าสัมประสิทธิ์พารามิเตอร์ (Distributed-parameter model) พัฒนาโดย Arnold และคณะ ในปี ค.ศ. 1998 [2] ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับการประเมินปริมาณน้ำท่าทั้งรายวันและรายเดือนภายในพื้นที่ลุ่มน้ำขนาดใหญ่ โดยอาศัยข้อมูลเชิงกายภาพต่อเนื่องตามระยะเวลาที่พิจารณา อาทิ ข้อมูลสภาพภูมิอากาศ ข้อมูลด้านอุทกวิทยา ข้อมูลคุณสมบัติดิน และข้อมูลการใช้ที่ดิน [3] แบบจำลอง SWAT สามารถใช้ในการประมาณปริมาณน้ำท่า และศึกษาการเปลี่ยนแปลงของน้ำท่าจากผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศและสิ่งปกคลุมดินในพื้นที่ต่างๆ ได้ เนื่องจากพารามิเตอร์ของแบบจำลองสร้างโดยอ้างอิงจากข้อมูลสภาพทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่ [4-5] แบบจำลอง SWAT ในโหมดการสังเคราะห์น้ำท่าประกอบด้วยพารามิเตอร์ที่สำคัญหลายตัวแทนกระบวนการทางอุทกวิทยา เช่น การดัก การเกิดน้ำท่าผิวดิน การซึม การคายและการคายน้ำของพืช เป็นต้น [3] ดังนั้นการวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ (Sensitivity analysis of parameters) ต่อผลการคำนวณน้ำท่าของแบบจำลองอุทกวิทยาจึงมีความจำเป็น เพื่อให้ทราบถึงพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญต่อการเกิดน้ำท่าของพื้นที่ศึกษานั้นๆ โดยการศึกษาครั้งนี้ได้มีการใช้โปรแกรม SWAT calibration and uncertainty program (SWAT-CUP) [6] มาใช้ในการวิเคราะห์และตรวจสอบค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ของแบบจำลอง SWAT ที่สร้างขึ้นสำหรับศึกษาปริมาณน้ำท่าในพื้นที่บริเวณตอนล่างของเขื่อนลำปาว นอกจากผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์จะเพิ่มความเข้าใจผลกระทบของพารามิเตอร์ต่อปริมาณน้ำท่าแล้ว จะช่วยให้การเลือกค่าพารามิเตอร์ได้อย่างเหมาะสมในกระบวนการปรับเทียบแบบจำลอง ทำให้ได้ผลการประมาณปริมาณน้ำท่าที่มีความแม่นยำยิ่งขึ้นด้วย [7]

วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง SWAT ที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำท่าในพื้นที่บริเวณตอนล่างของเขื่อนลำปาว
2. เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของพารามิเตอร์ในแบบจำลอง SWAT ในการคำนวณน้ำท่าในพื้นที่บริเวณตอนล่างของเขื่อนลำปาว

วิธีการวิจัย

พื้นที่ศึกษา

พื้นที่ศึกษาเลือกบริเวณลุ่มน้ำตอนล่างของเขื่อนลำปาว ครอบคลุมพื้นที่จังหวัดกาฬสินธุ์และจังหวัดมหาสารคาม เป็นลุ่มน้ำย่อยของลุ่มน้ำชี มีพื้นที่รวมทั้งสิ้น 4,216 ตารางกิโลเมตร มีสัดส่วน 8.58 % ของลุ่มน้ำชี และพื้นที่ศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของลุ่มน้ำลำปาวตอนล่างมีพื้นที่รวมทั้งสิ้น 1,178 ตารางกิโลเมตร (ภาพที่ 1) ครอบคลุมพื้นที่ อำเภอมือเก็ด อำเภอยางตลาด อำเภอร่องคำ อำเภอกมลาไสย และอำเภอฆ้องชัยของจังหวัดกาฬสินธุ์ มีแม่น้ำสายหลัก คือ แม่น้ำลำปาว ซึ่งไหลผ่านพื้นที่ศึกษาจากอ่างเก็บน้ำเขื่อนลำปาวในทิศเหนือสู่ทิศใต้ตลอดทั้งปี อีกทั้งพื้นที่ตอนกลางถึงตอนล่างบริเวณสองฝั่งของแม่น้ำลำปาวเป็นพื้นที่ราบน้ำท่วมถึง (Floodplain) ปัญหาทั่วไปที่เกิดในพื้นที่ลุ่มน้ำลำปาว ได้แก่ การขาดแคลนน้ำในต้นฤดูทำนาปีและฤดูแล้ง ส่วนในกลางฤดูฝน จะมีฝนตกชุกเป็นผลให้น้ำล้นตลิ่งและไหลเข้าท่วมพื้นที่ราบทั้งสองฝั่งของแม่น้ำลำปาวเกือบทุกปี

สภาพภูมิอากาศโดยทั่วไปในเขตพื้นที่ตอนล่างของลุ่มน้ำลำปาว จะได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือ นอกจากนั้นในแต่ละปีจะได้รับอิทธิพลจากลมดีเปรสชันซึ่งพัดมาจากทะเลจีนใต้ทำให้มีฝนตกหนักในฤดูฝน ผลกระทบจากอิทธิพลของลมมรสุมทั้งสองทำให้เกิดฤดูกาล 3 ฤดู คือ ฤดูฝน ฤดูหนาว และฤดูร้อน ตามปกติฤดูฝน จะเริ่มตั้งแต่ประมาณกลางเดือนพฤษภาคมจนถึงเดือนตุลาคม ในพื้นที่ลุ่มน้ำลำปาวจะมีฝนตกชุกในเดือน สิงหาคมและกันยายน ฤดูหนาวประมาณ 4 เดือน เริ่มตั้งแต่เดือนมีนาคมถึงกลางเดือนพฤษภาคม ตลอดทั้งปีพื้นที่ตอนล่างของลุ่มน้ำลำปาวจะมีปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยประมาณ 1,384 มม.ต่อปี (ศูนย์อุตุนิยมวิทยาภาคตะวันออกเฉียงเหนือตอนบน ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยในคาบ 30 ปี, พ.ศ. 2534-2563) ปริมาณน้ำท่าเฉลี่ยประมาณ 1,668 ล้าน ลบ.ม.ต่อปี จากข้อมูลน้ำท่าตรวจวัดที่สถานีบ้านวังหิน (E.87) ในช่วงปีพ.ศ. 2548-2560

การรวบรวมข้อมูล

ข้อมูลที่สำคัญในการสร้างแบบจำลอง SWAT แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ ข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial data) และข้อมูลอนุกรมเวลา (Time series data) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. ข้อมูลเชิงพื้นที่สำหรับการสร้างแบบจำลอง SWAT ในพื้นที่ลุ่มน้ำตอนล่างของเขื่อนลำปาว รวบรวมจากกรมพัฒนาที่ดิน ประกอบด้วย แบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข (Digital elevation model: DEM) ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land use data) และข้อมูลชนิดดิน (Soil type data)

แบบจำลองระดับความสูงเชิงเลข เป็นข้อมูลแผนที่แสดงระดับความสูงและลักษณะทางกายภาพของพื้นที่ ภาพที่ (1) แสดงลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ลุ่มน้ำตอนล่างของเขื่อนลำปาว ซึ่งได้จากการประมวลผลจากข้อมูลแบบจำลองระดับชั้นความสูงเชิงเลขขนาดความละเอียด 30x30 เมตร ปี พ.ศ. 2558 โดยที่ระดับสูงของพื้นที่อยู่ช่วงระหว่าง 131 ถึง 241 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลาง (ม.รทก.) มีความลาดชันจากด้านทิศเหนือลงมาด้านทิศใต้ของพื้นที่ศึกษา

ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน หมายถึง ข้อมูลแผนที่ที่แสดงสิ่งปกคลุมดินตามธรรมชาติและกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ที่กระทำต่อทรัพยากรที่ดิน ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน มาตราส่วน 1:50,000 สืบค้นด้วยกรมพัฒนาที่ดิน ช่วงปี พ.ศ. 2558 จากข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินดังกล่าว สามารถจัดกลุ่มการใช้ประโยชน์ที่ดินออกเป็น 8 ประเภท ได้แก่ พื้นที่แหล่งน้ำ (WATR) พื้นที่เมืองและสิ่งปลูกสร้าง (URBN) พื้นที่โล่งไร้สิ่งปกคลุม (SWRN) พื้นที่ป่าไม้ (FRST) พื้นที่ปกคลุมด้วยหญ้าและวัชพืช (RNGE) พื้นที่เกษตรกรรม (AGRL) พื้นที่ปลูกข้าว (RICE) และพื้นที่ชุ่มน้ำ (WETF) ดังแสดงในภาพที่ (2) พื้นที่ส่วนใหญ่ใช้เพื่อการปลูกข้าวและการเกษตรกรรม ประมาณ 969 ตารางกิโลเมตร หรือคิดเป็น 82.2% ของพื้นที่ศึกษา

ข้อมูลชนิดดิน หมายถึง ข้อมูลแผนที่แสดงชนิดและคุณสมบัติที่สำคัญของดิน ข้อมูลชนิดดินที่ใช้ในการศึกษานี้ได้รวบรวมจากกรมพัฒนาที่ดิน โดยได้จำแนกชนิดดินในฐานข้อมูลดิน มาตราส่วน 1:50,000 ของกรมพัฒนาที่ดิน พ.ศ. 2558 ข้อมูลชนิดดินในพื้นที่ลุ่มน้ำตอนล่างของเขื่อนลำปาว สามารถจำแนกออกเป็น 16 กลุ่ม ดังแสดงในภาพที่ (2) สำหรับรายละเอียดกลุ่มดินมีอธิบายอยู่ในระบบฐานข้อมูลกลุ่มชุดดิน 62 กลุ่มของกรมพัฒนาที่ดิน [8] กลุ่มดินส่วนใหญ่ในพื้นที่ศึกษาเป็นกลุ่มชุดดินที่ 17 (soil-17) ซึ่งจัดว่าเป็นดินร่วนเหนียวปนทราย มีพื้นที่ครอบคลุมประมาณ 584 ตารางกิโลเมตร หรือคิดเป็น 49.6% ของพื้นที่ศึกษา

2. ข้อมูลอนุกรมเวลาสำหรับการสร้างแบบจำลอง SWAT ประกอบด้วยข้อมูลอุทกนิยามวิทยา และข้อมูลทางอุทกวิทยารวบรวมจากกรมอุทกนิยามวิทยา และกรมชลประทาน ตามลำดับ

ข้อมูลอุทกนิยามวิทยาที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบไปด้วย ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายวันซึ่งได้รวบรวมมาจากสถานีวัดปริมาณน้ำฝนของกรมอุทกนิยามวิทยา จำนวน 5 สถานี ได้แก่ สถานี อ.เมืองมหาสารคาม จังหวัดมหาสารคาม (387001) สถานี อ.เมืองกาฬสินธุ์ (388001) สถานี อ.สหัสขันธ์ (388005) สถานีทลิ่งโพธิ์ไร่กาฬสินธุ์ อ.ยางตลาด (388008) และสถานีตรวจอากาศกาฬสินธุ์ อ.เมืองกาฬสินธุ์ (388401) จังหวัดกาฬสินธุ์ (ภาพที่ 1) นอกจากนี้ ได้รวบรวมข้อมูลอุณหภูมิต่ำสุดและต่ำสุดรายวัน ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยรายวัน และความเร็วลมเฉลี่ยรายวัน ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2534-2563 รวมเป็นจำนวนทั้งสิ้น 30 ปี จากสถานีตรวจอากาศกาฬสินธุ์

ข้อมูลทางอุทกวิทยาที่ใช้ในการศึกษานี้ประกอบไปด้วย ข้อมูลน้ำท่าตรวจวัดจากสถานีบ้านหนองม่วง (E.75) และสถานีบ้านวังหิน (E.87) จังหวัดกาฬสินธุ์ (ภาพที่ 1) สถานีบ้านหนองม่วงเป็นสถานีตรวจวัดน้ำท่าที่ไหลออกจากเขื่อนลำปาว ส่วนสถานีบ้านวังหินเป็นสถานีตรวจวัดน้ำท่าที่ไหลออกจากพื้นที่ศึกษา

การสร้างแบบจำลอง SWAT เพื่อประเมินปริมาณน้ำท่า

การสร้างแบบจำลอง SWAT สำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำตอนล่างของเขื่อนลำปาว เริ่มจากการประมวลผลแบบจำลองระดับความสูงเชิงตัวเลขเพื่อกำหนดขอบเขตลุ่มน้ำย่อย เส้นแนวลำน้ำและกำหนดจุดออกของกลุ่มน้ำ โดยใช้ชุดคำสั่งการกำหนดขอบเขตลุ่มน้ำ (Watershed delineation) ชุดคำสั่งนี้จะเริ่มด้วยการประมวลผลและกำหนดทิศทางการไหลและการไหลสะสมจากข้อมูลระดับความสูงเชิงตัวเลข การสร้างเส้นลำน้ำจำเป็นต้องคำนวณจุดเริ่มของเส้นลำน้ำโดยการกำหนดขนาดของพื้นที่รับน้ำด้านเหนือน้ำ ในการศึกษาที่กำหนดขนาดของพื้นที่รับน้ำดังกล่าวเท่ากับ 30 ตร.กม. ดังนั้นเส้นลำน้ำจะเริ่มจากตำแหน่งที่มีขนาดพื้นที่มากกว่าที่กำหนดและเชื่อมโยงไปตามเส้นทิศทางการไหล เมื่อเส้นลำน้ำบรรจบกันจะเกิดจุดต่อเชื่อม (Node) ซึ่งจุดต่อเชื่อมนี้คือจุดออกของกลุ่มน้ำย่อย จากนั้นการสร้างเส้นขอบเขตลุ่มน้ำย่อยจะประมวลผลจากตำแหน่งของจุดออกและพื้นที่รับน้ำของแต่ละลุ่มน้ำย่อย หลังจากได้ขอบเขตลุ่มน้ำย่อย เส้นแนวลำน้ำและค่าพารามิเตอร์ที่แสดงคุณลักษณะทางกายภาพของกลุ่มน้ำ แบบจำลอง SWAT อาศัยหน่วยตอบสนองทางอุทกวิทยา (Hydrologic response unit: HRU) ซึ่งเป็นการผสมผสานของข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ข้อมูลชนิดดิน และความลาดชันของผิวดิน และจำแนกเป็นกลุ่มย่อยเพื่อแสดงถึงลักษณะทางการตอบสนองทางอุทกวิทยาเฉพาะกลุ่ม

ขั้นตอนต่อไปนำเข้าข้อมูลสภาพอากาศประกอบด้วย ข้อมูลภูมิอากาศเฉลี่ย 30 ปี และข้อมูลตรวจวัดรายวัน ได้แก่ ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลม และการแผ่รังสีดวงอาทิตย์ จำนวน 13 ปี ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548-2560 ซึ่งเป็นช่วงที่มีข้อมูลต่อเนื่องค่อนข้างสมบูรณ์และครอบคลุมช่วงของข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน ข้อมูลปริมาณน้ำฝนตรวจวัดจาก 5 สถานี (ภาพที่ 4) ได้ผ่านการตรวจสอบความถูกต้องด้วยวิธีการเส้นโค้งทับทวี (Double mass curve) นอกจากนี้ ภาพที่ 4 แสดงสัดส่วนการแบ่งพื้นที่รับน้ำฝนบนพื้นที่ศึกษาของสถานีวัดปริมาณน้ำฝนทั้ง 5 สถานีด้วยวิธีธีเอสเซน (Thiessen polygon method) โดยสัดส่วนดังกล่าวนี้จะนำไปคำนวณหาค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละ

สถานีเพื่อกำหนดอิทธิพลของข้อมูลปริมาณน้ำฝนตรวจวัดจากแต่ละสถานีต่อการคำนวณปริมาณน้ำฝนเชิงพื้นที่ จากนั้นให้แบบจำลอง SWAT คำนวณปริมาณน้ำท่าจากข้อมูลสภาพอากาศ

การวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อปริมาณน้ำท่า

สำหรับการวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ที่มีผลต่อปริมาณน้ำท่าในพื้นที่บริเวณตอนล่างลุ่มน้ำลำปาวนี้ ใช้โปรแกรม SWAT-CUP โดยเลือกพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อปริมาณน้ำท่าจำนวน 24 ตัว [4,9-10] และใช้เทคนิคการค้นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมด้วยวิธี SUFI-2 [6] และทำการคำนวณจำนวน 500 รอบ โดยที่ช่วงค่าพารามิเตอร์เปลี่ยนแทนค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นของโปรแกรม แสดงในตารางที่ 1 ตัวแปรทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ในการศึกษานี้ ประกอบด้วย ดัชนี p-value และ t-stat หากพารามิเตอร์ตัวใดมีค่า p-value ใกล้ศูนย์ และค่าสัมบูรณ์ของ t-stat มีค่ามาก จะประเมินได้ว่าพารามิเตอร์ตัวนั้นมีความอ่อนไหวต่อผลลัพธ์ของการคำนวณด้วยแบบจำลอง [9]

การปรับเทียบ (Calibration) และสอบเทียบ (Validation) แบบจำลอง SWAT

เมื่อทราบความสำคัญของพารามิเตอร์และได้ช่วงค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากกระบวนการวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ จะใช้แบบจำลอง SWAT ในการคำนวณปริมาณน้ำท่ารายวันที่สถานีวัดน้ำท่าบ้านวังหิน (E.87) จากข้อมูลปริมาณน้ำฝนตรวจวัดจาก 5 สถานี ในช่วงข้อมูลปี พ.ศ. 2548-2560 โดยกำหนดให้ช่วงข้อมูลปี พ.ศ. 2548-2550 เป็นข้อมูลนำเข้าเพื่อเริ่มการประมวลผล (Warm up) ของแบบจำลอง SWAT ส่วนขั้นตอนการปรับเทียบแบบจำลอง SWAT ใช้ช่วงข้อมูลปี พ.ศ. 2551-2555 ในขั้นตอนการปรับเทียบนี้ ค่าของพารามิเตอร์จะถูกปรับเปลี่ยนจากค่าเริ่มต้นจนกระทั่งผลการคำนวณปริมาณน้ำท่าด้วยแบบจำลอง SWAT เป็นที่ยอมรับได้ และใช้ช่วงข้อมูลปี พ.ศ. 2556-2560 และค่าของพารามิเตอร์ชุดเดียวกันกับในกระบวนการปรับเทียบเพื่อการสอบเทียบแบบจำลอง SWAT โดยมีดัชนีทางสถิติที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง SWAT ประกอบด้วย สัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ (Coefficient of determination, R^2) ดัชนีประสิทธิภาพ Nash-Sutcliffe (Nash-Sutcliffe efficiency, NSE) ร้อยละความเอนเอียงของการประมาณ (Percent bias, PBIAS) ซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการ (1) (2) และ (3) ตามลำดับดังต่อไปนี้

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n ((Q_{obs} - \bar{Q}_{obs}) \times (Q_{sim} - \bar{Q}_{sim}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})^2}} \right]^2 \quad (1)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (2)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs})} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ Q_{obs} คือ ค่าปริมาณน้ำท่าจากการตรวจวัด $\bar{Q}_{obs}$ คือ ค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำท่าจากการตรวจวัด Q_{sim} คือ ค่าปริมาณน้ำท่าจากการคำนวณด้วยแบบจำลอง $\bar{Q}_{sim}$ คือ ค่าเฉลี่ยของปริมาณน้ำท่าจากการคำนวณด้วยแบบจำลอง

โดยทั่วไป สัมประสิทธิ์ในการตัดสินใจ และดัชนีประสิทธิภาพ Nash-Sutcliffe จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 ซึ่งหากมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าข้อมูลจากการตรวจวัดและจากการคำนวณมีความสัมพันธ์กันมาก หรือแบบจำลองมีประสิทธิภาพสูง แต่หากมีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่าข้อมูลทั้ง 2 กลุ่มมีความสัมพันธ์กันน้อย สำหรับดัชนีร้อยละความเอนเอียง

ของการประมาณ (PBIAS) ใช้วัดแนวโน้มโดยเฉลี่ยของข้อมูลเป็นร้อยละความแตกต่างระหว่างค่าตรวจวัดกับค่าจากการคำนวณ ถ้าหากดัชนี PBIAS มีค่าเข้าใกล้ 0 หมายถึงผลการคำนวณมีความน่าเชื่อถือ ถ้าค่าเป็นบวกบ่งบอกถึงการคำนวณให้ผลต่ำกว่าค่าที่ตรวจวัด แต่หากค่าเป็นลบแสดงถึงการคำนวณที่ให้ค่าสูงกว่าค่าที่ตรวจวัด ดังนั้นในการศึกษานี้ใช้หลักเกณฑ์ในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง ดังแสดงในตารางที่ 2

ผลและอภิปรายผลการวิจัย

ผลการสร้างแบบจำลอง SWAT เพื่อประมาณปริมาณน้ำท่าในบริเวณพื้นที่ตอนล่างของกลุ่มน้ำลำปาว พบว่าแบบจำลองแบ่งพื้นที่ศึกษาออกเป็น 29 กลุ่มน้ำย่อย ดังแสดงในภาพที่ (4) ซึ่งประกอบด้วย HRUs จำนวน 116 หน่วย จากข้อมูลแผนที่ระดับชั้นความสูงเชิงเลข ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน และข้อมูลชนิดดิน นอกจากนี้ ภาพที่ 4 แสดงอิทธิพลของสถานีวัดปริมาณน้ำฝนทั้ง 5 สถานีบนพื้นที่ศึกษาจากการแบ่งสัดส่วนพื้นที่รับน้ำฝนของแต่ละสถานีด้วยวิธีเอสเซนส์สัดส่วนพื้นที่รับน้ำฝนดังกล่าวนี้คือค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับการคำนวณข้อมูลปริมาณน้ำฝนเชิงพื้นที่ของสถานีวัดปริมาณน้ำฝน จากผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีเอสเซนส์ สถานีตรวจอากาศกาฬสินธุ์ (388401) สถานี อ.สหัสขันธ์ (388005) สถานี อ.เมืองกาฬสินธุ์ (388001) สถานี อ.เมืองมหาสารคาม (387001) และสถานีทดลองพืชไร่กาฬสินธุ์ (388008) มีค่าถ่วงน้ำหนักเท่ากับ 0.05 0.09 0.26 0.28 และ 0.33 ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ของแบบจำลอง SWAT ต่อปริมาณน้ำท่า ด้วยโปรแกรม SWAT-CUP จะสามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์แบบ Global sensitivity analysis ได้ ดังแสดงในภาพที่ (5) พบว่าพารามิเตอร์ ALPHA_BNK CH_K2 CH_N2 ESCO และ REVAPMN มีค่า p-value น้อยกว่า 0.1 และค่า t-stat อยู่ในช่วง -4.1 ถึง 20.0 ซึ่งมีค่าสัมบูรณ์มากที่สุดเป็น 5 อันดับแรก ดังนั้นค่าพารามิเตอร์ของ ALPHA_BNK CH_K2 CH_N2 ESCO และ REVAPMN ที่มีความสำคัญและมีผลกระทบต่อปริมาณน้ำท่าของแบบจำลอง SWAT ของพื้นที่ตอนล่างของกลุ่มน้ำลำปาว พารามิเตอร์ CH_K2 CH_N2 ALPHA_BNK และ REVAPMN เป็นพารามิเตอร์ที่มีความอ่อนไหวมากต่อการคำนวณการเคลื่อนย้ายมวลน้ำในลำน้ำของพื้นที่ศึกษา จะเห็นได้ว่ามีความสอดคล้องกับลักษณะภูมิประเทศและสภาพทางอุทกวิทยาของพื้นที่ศึกษาบริเวณตอนกลางถึงตอนล่างบริเวณทั้งสองฝั่งแม่น้ำสายหลักเป็นพื้นที่ราบน้ำท่วมถึงและมีน้ำไหลผ่านตลอดทั้งปี ซึ่งสามารถอธิบายการเกิดน้ำท่าของพื้นที่ศึกษาได้ว่าการไหลของน้ำท่าได้รับอิทธิพลมากจากการไหลรวมของน้ำผิวดินและน้ำใต้ดิน ในอนาคตพารามิเตอร์ดังกล่าวนี้คาดว่าจะยังมีอิทธิพลต่อการเกิดน้ำท่าหากลักษณะภูมิประเทศยังเป็นพื้นที่ราบน้ำท่วมถึง พารามิเตอร์อีกตัวที่พบว่ามีค่าความอ่อนไหวต่อการคำนวณปริมาณน้ำท่าของพื้นที่ศึกษาคือ ESCO ซึ่งเป็นตัวแปรที่ใช้อธิบายการชดเชยการระเหยของดิน (Soil evaporation compensation) ตัวแปรนี้จะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดิน ส่วนพารามิเตอร์ที่มีความอ่อนไหวต่ำ อาทิ GWQMN และ SOL_AWC เนื่องจากมีค่า p-value มากเป็นสองลำดับแรกจากพารามิเตอร์ที่พิจารณาทั้งหมด พารามิเตอร์ทั้ง 2 ตัวนี้เป็นตัวแปรในสมการอธิบายการไหลของน้ำใต้ดินระดับตื้น (Shallow aquifer) เป็นปริมาณน้ำไหลกลับ (Return flow) และสมการอธิบายปริมาณน้ำในดินที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ (Available water capacity)

ผลการวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ในการศึกษานี้ มีส่วนสอดคล้องกับการศึกษาของ Phiri และคณะ [12] ที่ได้พบว่าพารามิเตอร์ ALPHA_BNK CH_K2 และ GW_DELAY มีความอ่อนไหวต่อการคำนวณปริมาณน้ำท่าของพื้นที่น้ำท่วมถึงของกลุ่มน้ำ Luanginga ในสาธารณรัฐแซมเบีย พร้อมทั้งอภิปรายผลว่าพารามิเตอร์ ALPHA_BNK ซึ่งแทนการกักเก็บน้ำใต้ผิวดินบริเวณพื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำมีความสำคัญต่อการไหลของน้ำท่าโดยเฉพาะพื้นที่น้ำท่วมซ้ำซาก ผลการวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์ในการศึกษานี้ยังมีส่วนสอดคล้องกับการศึกษาของ Worqlul และคณะ [5] ที่พบว่าพารามิเตอร์ ESCO เป็นหนึ่งในตัวแปรที่มีความอ่อนไหวต่อการคำนวณปริมาณน้ำท่าของกลุ่มน้ำ Ribb ประเทศเอธิโอเปีย ซึ่งกลุ่มน้ำ Ribb นี้มีพื้นที่

ส่วนใหญ่เป็นดินร่วนเหนียว อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์เป็นกระบวนการที่มีความสำคัญต่อการสร้างแบบจำลองทางอุทกวิทยา โดยเฉพาะการคำนวณปริมาณน้ำท่า แต่เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของแต่ละพื้นที่มีความแตกต่างกัน จึงอาจจะส่งผลให้กลุ่มพารามิเตอร์ที่มีผลต่อกระบวนการเกิดน้ำท่าแตกต่างกัน ตัวอย่างเช่น การศึกษาของ Alim และคณะ [13] พบว่าค่าพารามิเตอร์ของ ALPHA_BK CH_K2 CH_N2 ESCO CN2 GW_Delay และ GW_Revap มีความอ่อนไหวต่อปริมาณน้ำท่าในลุ่มน้ำ Cisadane บนเกาะ West Java ประเทศอินโดนีเซีย แต่การศึกษาของ Narula และ Nischal [7] พบว่าค่าพารามิเตอร์ของ SOL_AWC ESCO SOL_Z ALPHA_BF และ CN2 เป็นพารามิเตอร์ที่มีความอ่อนไหวต่อผลการคำนวณน้ำท่าของแบบจำลอง SWAT สำหรับลุ่มน้ำ Gurupur ซึ่งมีลักษณะเป็นพื้นที่ภูเขาปกคลุมด้วยป่าไม้ในประเทศอินเดีย

ผลการเปรียบเทียบและสอบเทียบแบบจำลอง SWAT พิจารณาจากการเปรียบเทียบผลการคำนวณปริมาณน้ำท่าด้วยแบบจำลอง SWAT กับข้อมูลตรวจวัดน้ำท่าจากสถานีวัดน้ำท่าบ้านวังหิน E.87 โดยแบ่งช่วงข้อมูลเป็น ปี พ.ศ. 2551-2555 และปี พ.ศ. 2556-2560 สำหรับการเปรียบเทียบและสอบเทียบแบบจำลอง ตามลำดับ ผลการเปรียบเทียบปริมาณน้ำท่าจากทั้ง 2 ชุดข้อมูล แสดงในภาพที่ (6) และผลการประเมินประสิทธิภาพแบบจำลองด้วยค่าทางสถิติ R^2 NSE และ PBIAS แสดงในตารางที่ 3 พบว่า ประสิทธิภาพแบบจำลอง SWAT ในการสังเคราะห์น้ำท่าสำหรับพื้นที่ลุ่มน้ำตอนล่างของเขื่อนลำปาวเป็นที่ยอมรับได้ เนื่องจากผลการเปรียบเทียบและสอบเทียบแบบจำลอง SWAT มีค่าเฉลี่ยของ R^2 และ NSE อยู่ในช่วง 0.65 ถึง 0.75 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ดี และค่าเฉลี่ย PBIAS น้อยกว่า 10 อยู่ในเกณฑ์ดีมาก

สรุปผลการวิจัย

การวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง SWAT ที่ส่งผลต่อปริมาณน้ำท่ารายวันในพื้นที่ตอนล่างของเขื่อนลำปาว โดยพิจารณาจากพารามิเตอร์จำนวน 24 ตัว มีพารามิเตอร์ ALPHA_BK และ CH_K2 ซึ่งเป็นพารามิเตอร์กลุ่มการเคลื่อนย้ายมวลน้ำ (Water routing) CH_N2 แทนพารามิเตอร์กลุ่มน้ำผิวดิน (Surface runoff) REVAPMN แทนพารามิเตอร์กลุ่มน้ำใต้ดิน (Groundwater) และ ESCO แทนกลุ่มการคายระเหย (Evapotranspiration) รวมทั้งหมด 5 ตัวเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญและมีผลกระทบต่อการคำนวณปริมาณน้ำท่าของแบบจำลอง SWAT ของพื้นที่ตอนล่างของเขื่อนลำปาว พารามิเตอร์ของแบบจำลอง SWAT ที่มีความอ่อนไหวต่อปริมาณน้ำท่าจะมีความหลากหลายขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศและภูมิอากาศของพื้นที่ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องวิเคราะห์ค่าความอ่อนไหวของพารามิเตอร์และทำความเข้าใจกับพารามิเตอร์ของแบบจำลอง เพื่อจะได้เลือกค่าของพารามิเตอร์ให้เหมาะสม นอกจากนี้แบบจำลอง SWAT ของพื้นที่บริเวณตอนล่างของเขื่อนลำปาวมีประสิทธิภาพยอมรับได้ในการสังเคราะห์น้ำท่า เนื่องจากค่าดัชนี R^2 NSE และ PBIAS เท่ากับ 0.70 0.74 และ 0.01 % ตามลำดับ ในการปรับเทียบแบบจำลอง และค่าดัชนี R^2 NSE และ PBIAS เท่ากับ 0.86 0.75 และ 9.41 % ตามลำดับ ในการสอบเทียบแบบจำลอง แบบจำลอง SWAT ประกอบด้วยพารามิเตอร์หลายตัวที่เกี่ยวข้องกับข้อมูลพื้นฐานทางกายภาพของลุ่มน้ำ ดังนั้นการศึกษาเชิงลึกเกี่ยวกับความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ในแบบจำลองอุทกวิทยากับคุณสมบัติทางกายภาพของลุ่มน้ำที่ตั้งอยู่ในสภาพภูมิอากาศที่มีความคล้ายกันและแตกต่างกันจึงมีความจำเป็น เพื่อพัฒนาวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์และปรับปรุงแบบจำลองให้มีประสิทธิภาพในการสังเคราะห์น้ำท่ามากขึ้น โดยสรุปการศึกษานี้ได้แนะนำแนวทางในการประยุกต์ใช้แบบจำลองอุทกวิทยา เพื่อให้สามารถเลือกและปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับการศึกษาน้ำท่าได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตขอนแก่น คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น กรมชลประทาน กรมอุตุนิยมวิทยาและกรมพัฒนาที่ดิน ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลและสถานที่สำหรับการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Lohpaisankrit W, Prasanchum H. Catchment-scale flood hazard mapping in the lower areas of Lam Pao River basin, Thailand. Eng. Access. 2022; 8(1): 53–60.
2. Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, Williams JR. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. J Am Water Resources Assoc. 1998; 34(1): 73–89.
3. Arnold JG, Fohrer N. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. Hydrol. Process. 2005; 19(3): 563–572.
4. Brighenti TM, Bonumá NB, Grison F, Mota AdA, Kobiyama M, Chaffe PLB. Two calibration methods for modeling streamflow and suspended sediment with the SWAT model. Ecol. Eng. 2019; 127: 103–113.
5. Worqlul AW, Ayana EK, Yen H, Jeong J, MacAlister C, Taylor R, et al. Evaluating hydrologic responses to soil characteristics using SWAT model in a paired-watersheds in the Upper Blue Nile basin. CATENA. 2018; 163: 332–341.
6. Abbaspour KC. SWAT-CUP: SWAT calibration and uncertainty programs - A user manual. EAWAG: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology; 2015.
7. Narula KK, Nischal S. Hydrological modelling of small gauged and ungauged mountainous watersheds using SWAT: a case of Western Ghats in India. J. Water Resour. Prot. 2021; 13(7): 455–477.
8. Land Development Department. 62 soil groups [Internet]. 2010 [updated 2010 Mar 22; cited 2022 Jul 5]. Available from: https://www.ddd.go.th/thaisoils_museum/62_soilgroup/main_62soilgroup.htm. Thai.
9. Khalid K, Ali MF, Rahman NFA, Mispan MR, Haron SH, Othman Z, et al. Sensitivity analysis in watershed model using SUFI-2 algorithm. Procedia Eng. 2016; 162: 441–447.
10. Me W, Abell JM, Hamilton DP. Effects of hydrologic conditions on SWAT model performance and parameter sensitivity for a small, mixed land use catchment in New Zealand. Hydrol. Earth Syst. Sci. 2015; 19(10): 4127–4147.
11. Moriasi DN, Gitau MW, Pai N, Daggupati P. Hydrologic and water quality models: performance measures and evaluation criteria. Trans. ASABE. 2015; 58(6): 1763–1785.
12. Phiri WK, Vanzo D, Banda K, Nyirenda E, Nyambe IA. A pseudo-reservoir concept in SWAT model for the simulation of an alluvial floodplain in a complex tropical river basin. J. Hydrol. Reg. Stud. 2021; 33: 1000770.
13. Alim N, Tarigan SD, Tejo Baskoro DP, Wahjunie ED. Parameter sensitivity test of SWAT hydrological model on two different resolutions (a case study of upper Cisadane subbasin, West Java). J. Trop. Soils. 2018; 23(1): 47–53.

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่มีผลต่อปริมาณน้ำท่าในแบบจำลอง SWAT และค่าพารามิเตอร์หลังปรับเทียบ

พารามิเตอร์	ความหมายของพารามิเตอร์	ช่วงการแทนค่า		หลังปรับเทียบ
		ต่ำสุด	สูงสุด	
CN2*	SCS runoff curve number for moisture condition II	-0.3	0.3	0.20
SURLAG	Surface runoff lag coefficient	0.05	24	13.97
SOL_AWC*	Available water capacity of the soil layer (mm/mm)	-0.5	0.5	-0.48
SOL_BD*	Moist bulk density	-0.3	0.3	0.07
SOL_K*	Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)	-0.3	0.3	0.03
SOL_ALB*	Moist soil albedo	-0.3	0.3	-0.05
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor (days)	0.01	1.0	0.85
GW_DELAY	Groundwater delay (days)	30	500	179.14
GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm)	0.1	5000	3306.95
GW_REVAP	Groundwater "revap" coefficient	0.02	0.2	0.20
RCHRG_DP	Deep aquifer percolation fraction	0.01	1.0	0.85
REVAPMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer for "revap" to occur (mm)	1.0	500	238.06
GW_SPYLD	Specific yield of the shallow aquifer (m ³ /m ³)	0.01	0.4	0.03
CH_N2	Manning's "n" value for the main channel	0.01	0.3	0.23
CH_N1	Manning's "n" value for the tributary channels	0.01	30	22.85
CH_K2	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium (mm/hr)	0.01	500	108.34
CH_K1	Effective hydraulic conductivity in tributary channel alluvium	0.01	300	65.00
ALPHA_BNK	Baseflow alpha factor for bank storage	0.01	1.0	0.62
SLSUBBSN	Average slope length (m)	10	150	101.00
OV_N	Manning's "n" value for overland flow.	0.01	0.8	0.23
CANMX	Maximum canopy storage (mm)	1.0	100	71.95
ESCO	Soil evaporation compensation factor	0.01	1.0	0.76
EPCO	Plant uptake compensation factor	0.01	1.0	0.79
HRU_SLP	Average slope steepness (m/m)	0.01	1.0	0.77

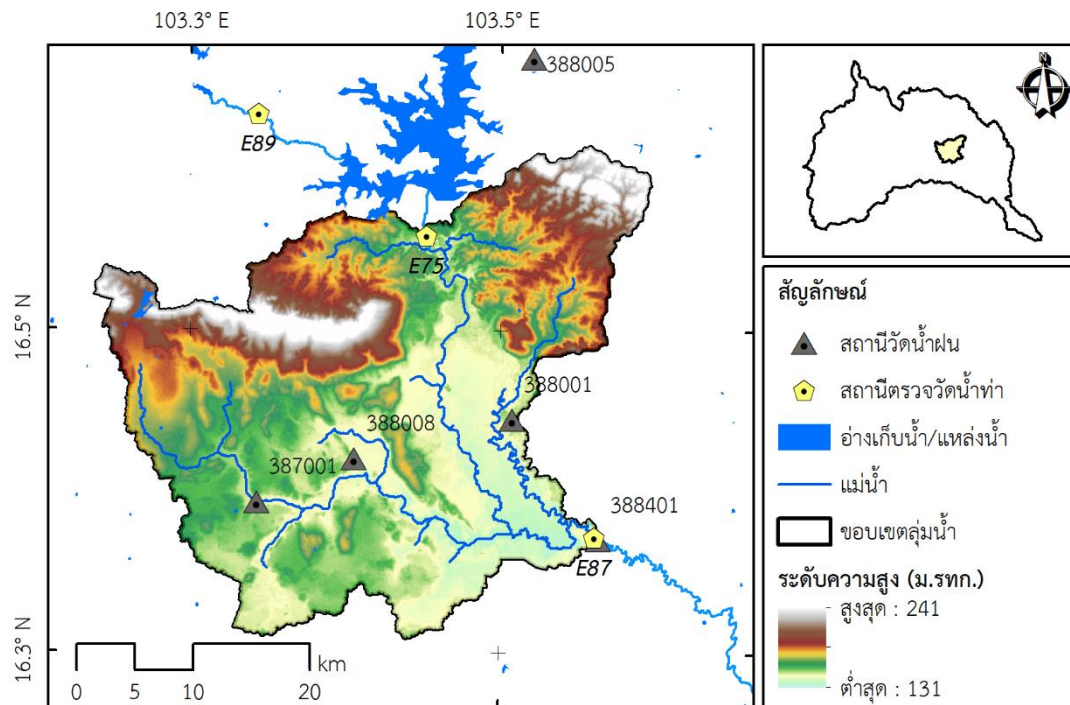
* แทนค่าพารามิเตอร์ด้วยค่าการเปลี่ยนแปลงสัมพัทธ์เทียบกับค่าเริ่มต้นของพารามิเตอร์

ตารางที่ 2 เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินประสิทธิภาพแบบจำลอง [11]

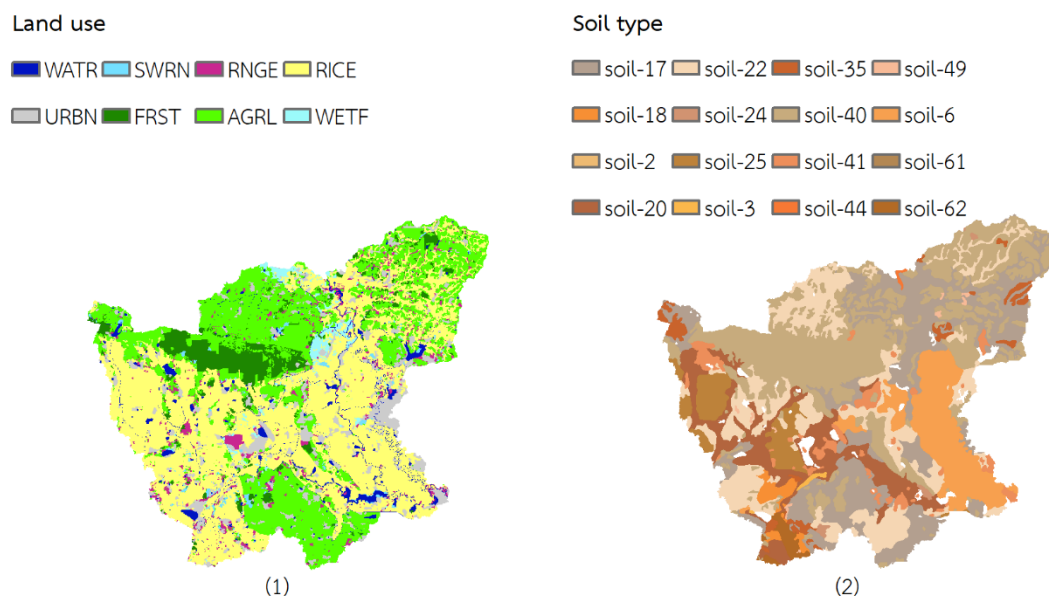
ระดับประสิทธิภาพแบบจำลอง	เกณฑ์ทางสถิติ		
	R ²	NSE	PBIAS (%)
ดีมาก	0.75 < R ² ≤ 1.00	0.75 < NSE ≤ 1.00	PBIAS < ±10
ดี	0.65 < R ² ≤ 0.75	0.65 < NSE ≤ 0.75	±10 ≤ PBIAS < ±15
น่าพอใจ	0.50 < R ² ≤ 0.65	0.50 < NSE ≤ 0.65	±15 ≤ PBIAS < ±25
ไม่น่าพอใจ	R ² ≤ 0.50	NSE ≤ 0.50	PBIAS ≥ ±25

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพในการคำนวณน้ำท่าของแบบจำลอง SWAT สถานีวัดน้ำท่าบ้านวังหิน E.87 ก่อนและหลังปรับค่าพารามิเตอร์

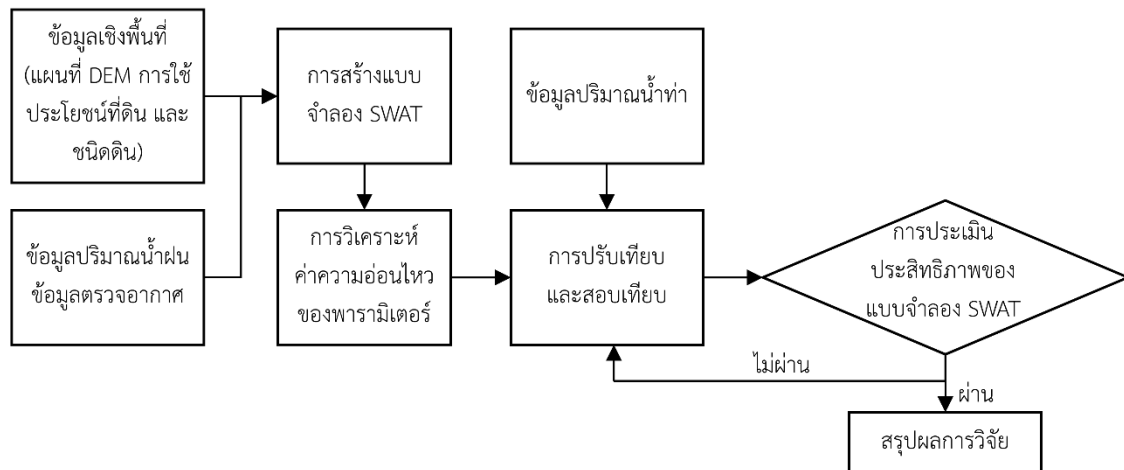
ช่วง	ก่อนปรับพารามิเตอร์			หลังปรับพารามิเตอร์		
	R ²	NSE	PBIAS	R ²	NSE	PBIAS
ปรับเทียบ (พ.ศ. 2551-2555)	0.39	0.25	7.26%	0.70	0.74	0.01%
สอบเทียบ (พ.ศ. 2556-2560)	0.51	0.67	15.75%	0.75	0.86	9.41%



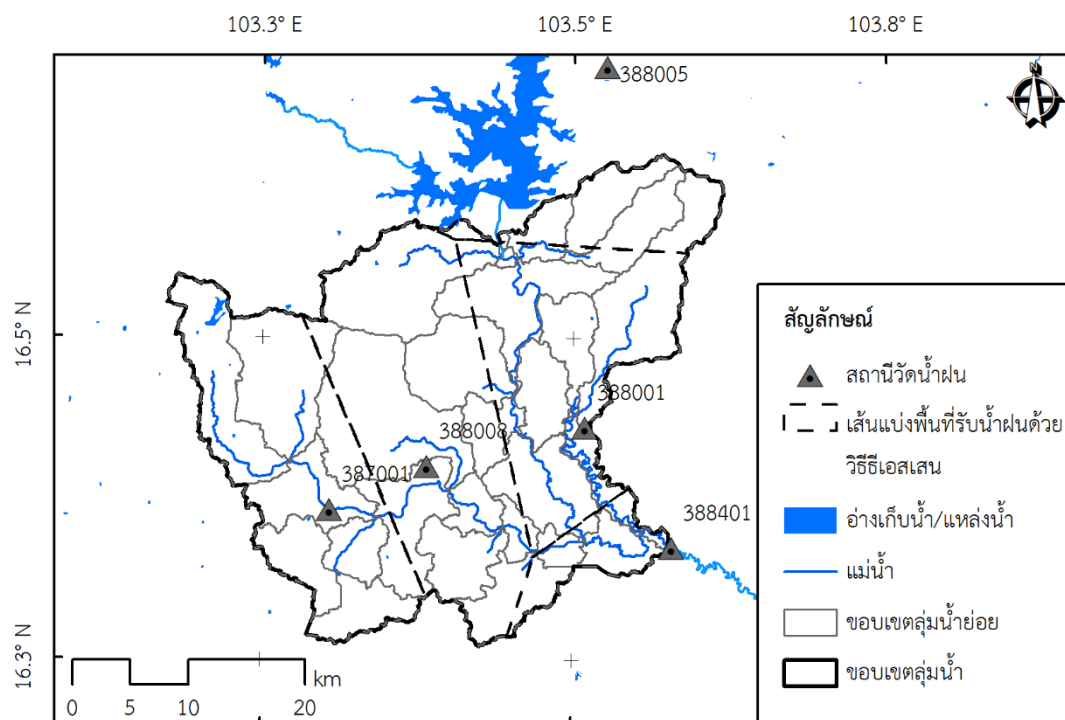
ภาพที่ 1 พื้นที่ศึกษาตอนล่างของเขื่อนลำปาว



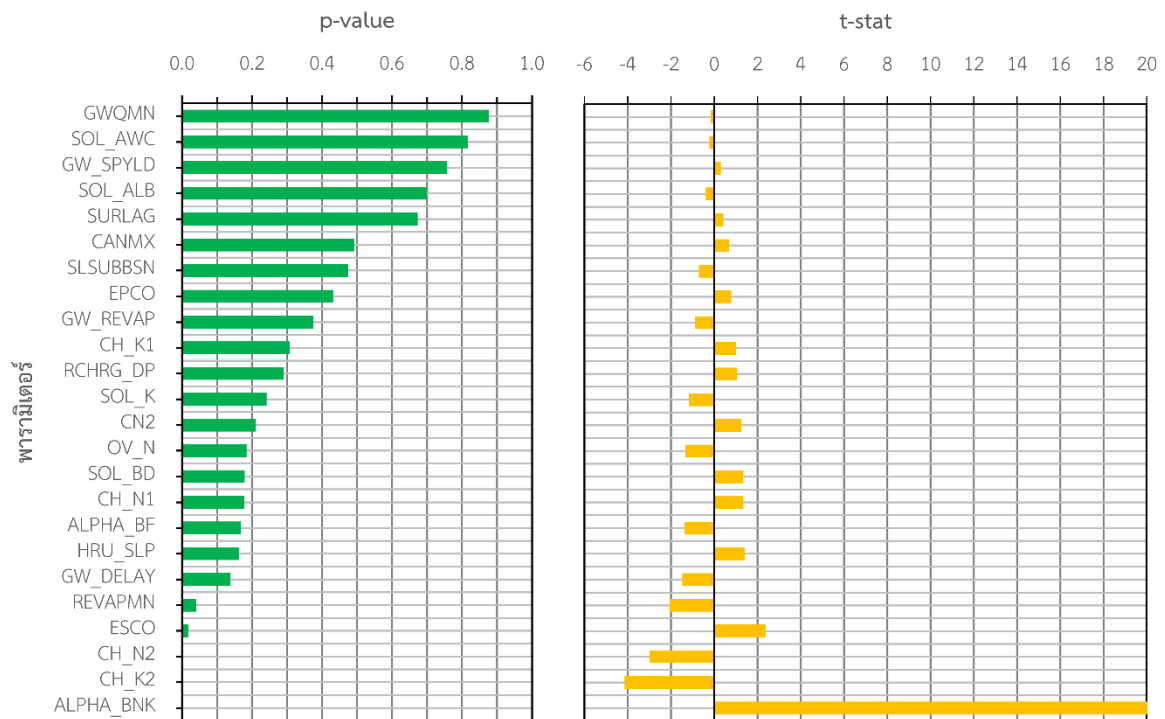
ภาพที่ 2 ข้อมูลเชิงพื้นที่ตอนล่างของเขื่อนลำปาว (1) ข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดิน (2) ข้อมูลชนิดดิน



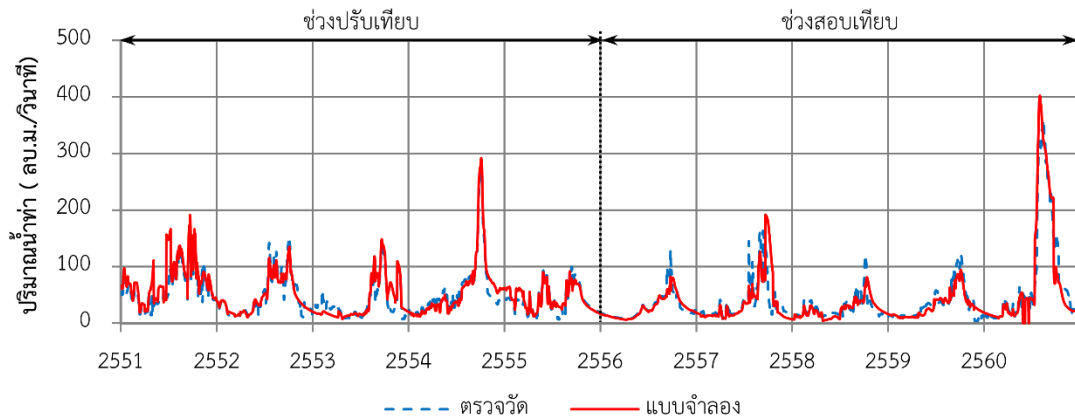
ภาพที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย



ภาพที่ 4 การแบ่งขอบเขตลุ่มน้ำย่อยด้วยแบบจำลอง SWAT และพื้นที่รับน้ำฝนประมาณด้วยวิธีเอสเอสเอ็น



ภาพที่ 5 ผลการวิเคราะห์ Global sensitivity analysis ด้วยโปรแกรม SWAT-CUP



ภาพที่ 6 การปรับเทียบและสอบเทียบปริมาณน้ำท่ารายวันที่ตรวจวัดจากสถานีวัดน้ำท่าบ้านวังหิน E.87 และผลการคำนวณด้วยแบบจำลอง SWAT